Vol.11, No.2, Summer 2022, pp.1-21 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI:10.22067/geoeh.2021.69988.1048 Open access

Landslide Hazard Zonation in Kolur Region Using Bayes' Theorem-ANP Hybrid Model

Farangis Nazari Bayatiani[a], Mansour Jafarbeglou[b*], Shirin Mohammadkhan[c], Mehran Maghsoudi [d]

[a] PhD Candidate in Geomorphology, Kish International Bridge, Tehran University Khorramshahr University of Marine Science and Technology, Khorramshahr, Iran
[b] Associate Professor of Geography, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.
[c] Assistant Professor of Geography, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.
[d] Associate Professor of Geography, Department of Geography, Tehran University, Tehran, Iran.

Received:* *22 April 2021 ***Revised: 14 November 2021*** ***Accepted: 20 November 2021***

Abstract

Identifying the factors affecting landslides occurrence in an area and zoning its hazard is one of the basic measures to achieve solutions to control this phenomenon and reduce its environmental hazards. The aim of this study was to determine the areas sensitive to the possibility of landslides occurrence in the Kolur region (Khalkhal County). In this regard, 9 factors affecting the landslides occurrence in the region including lithology, elevation, slope, slope direction, land use, faults, road construction, drainage network and precipitation were identified and used. Then, to determine the vulnerable areas, the hybrid models of conditional probabilities (Bayes' theorem) and network analysis process (ANP) were used. As for landslides occurrence, the results showed that about 28.69% and 25.40% of the study area had a very high risk, about 21.57% of the study area had a moderate risk, and finally about 14.21 and 13.10% of the study area had a low and a very low risk, respectively. Therefore, 65% of the Kolur region had a high and a very high risk of landslides. The main reason was due to the high slope and the presence of marl calcareous formations. According to the obtained results and the relationship between the area of hazardous zones and the percentage of landslide with R2 more than 0.93, the accuracy of landslide hazard zoning map in the study area was confirmed at a good level. Therefore, the results of the combined Bayes' theorem-ANP model were suitable for landslide risk zoning in this type of areas, and the resulting map can be used as a valuable tool in environmental planning and reducing landslide occurrence costs.

Keywords: Environmental Hazards, Landslide, Bayes' Theorem, ANP, Kolur

[*] Corresponding Author: Mansour Jafarbeglou E-mail: mjbeglou@ut.ac.ir Tel: +989123875568

How to cite this Article: Nazari bayatiani, F., Jafar Beglou, M., Mohammad Khan, S., Maghsoudi, M. (2022). Landslide Hazard Zonation in Kolur Region Using Bayes' Theorem-ANP Hybrid Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *11*(2), 1-21.
DOI:10.22067/geoeh.2021.69988.1048

Geography and Environmental Hazards
Volume 11, Issue 2 - Number 42, Summer 2022
https://geoeh.um.ac.ir
https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.69988.1048

جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال یازدهم، شمارهٔ چهل و دوم، تابستان ۱۴۰۱، صص ۲۱-۱

مقاله پژوهشی

پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور با استفاده از مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP

فرنگیس نظری بیاتیانی- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، پردیس بین‌الملل کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
منصور جعفربگلو[1]- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
شیرین محمدخان- استادیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.
مهران مقصودی- دانشیار ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۲/۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۸/۲۳ تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۸/۲۹

چکیده

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش در یک منطقه و پهنه‌بندی خطر آن یکی از اقدامات اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و کاهش مخاطرات محیطی ناشی از آن است. تحقیق حاضر با هدف تعیین عرصه‌های حساس نسبت به احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور (شهرستان خلخال) انجام گرفته است. در این راستا، ۹ عامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه شامل لیتولوژی، ارتفاع، شیب، جهت شیب، کاربری اراضی، گسل، جاده‌سازی، شبکه زهکشی و بارش، شناسایی شدند و مورد استفاده قرار گرفتند. در ادامه، جهت تعیین عرصه‌های آسیب‌پذیر از مدل ترکیبی احتمالات شرطی (قضیه بیز) و فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) بهره گرفته شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پهنه‌های با خطر خیلی زیاد و زیاد به ترتیب حدود ۲۸/۶۹ و ۲۵/۴۰ درصد، پهنه‌های با خطر متوسط حدود ۲۱/۵۷ درصد و پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم نیز به ترتیب ۱۴/۲۱ و ۱۰/۱۳ درصد از منطقه موردمطالعه را شامل می‌شوند؛ بنابراین، بیش از ۵۴ درصد از منطقه کلور دارای پتانسیل خطر زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش است که دلیل اصلی آن شیب زیاد و وجود سازندهای آهکی مارنی است. همچنین، صحت

۱ نویسنده مسئول: ۰۹۱۲۳۸۷۵۵۶۸ Email: mjbeglou@ut.ac.ir

نحوه ارجاع به این مقاله:

نظری بیاتیانی، فرنگیس؛ جعفربگلو، منصور؛ محمدخان، شیرین؛ مقصودی، مهران؛ ۱۴۰۱. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور با استفاده از مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. ۱۱(۲). صص ۲۱-۱

https://dx.doi.org/10.22067/geoeh.2021.69988.1048

نتایج با بررسی رابطه مساحت پهنه‌های خطر و مساحت سطوح لغزشی و R^2 بیش از ۰/۹۳ در سطح خوبی مورد تأیید قرار گرفت؛ بنابراین، نتایج مدل ترکیبی قضیه بیز-ANP برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در این نوع مناطق مناسب بوده و نقشه حاصل از آن همراه با شرح تفصیلی می‌تواند به‌عنوان ابزاری ارزشمند در برنامه‌ریزی محیطی و کاهش هزینه‌های رخ داد زمین‌لغزش مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: مخاطرات محیطی، زمین‌لغزش، قضیه بیز، ANP، کلور.

۱- مقدمه

پدیده زمین‌لغزش ازجمله انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای است که هرساله خسارات مالی و جانی بسیاری را بر زندگی انسان‌ها وارد می‌کند. زمین‌لغزش به‌عنوان پدیده‌ای طبیعی، عبارت است از پایین افتادن یا حرکت یکپارچه و اغلب سریع حجمی از مواد رسوبی در امتداد دامنه‌ها (براب[1]، ۱۹۸٤؛ محمودی، ۱۳۸۲). این پدیده ازجمله فرایندهای ژئومورفیک عمده در چشم‌انداز مناطق کوهستانی است (هاتانچی و موراواکی[2]، ۲۰۰۹) که مطابق با گزارش‌های جهانی مخاطرات طبیعی در سال ۲۰۱۲، در میان هفت بلای طبیعی خطرناک جهان قرار گرفته است (فتحی و همکاران، ۲۰۱۵)؛ به‌طوری‌که سالانه منجر به میلیاردها دلار خسارت اقتصادی در کشورهایی همچون ژاپن، هند، ایتالیا و ایالات‌متحده آمریکا می‌شود (باسو و سادس[3]، ۲۰۱۹). در ایران نیز خسارات ناشی از زمین‌لغزش‌ها آمار و ارقام قابل توجهی را به خود اختصاص داده‌اند (فرجی سبکبار و همکاران، ۲۰۱٤). زمین‌لغزش تحت مجموعه‌ای از شرایط روی می‌دهد و ممکن است به‌واسطه فاکتورهای زمین محیطی همچون شیب، ارتفاع، لیتولوژی، ژئومورفولوژی و غیره تحت تأثیر قرار گیرد. علاوه بر این عوامل خارجی مانند بارندگی، زلزله و فعالیت‌های انسانی مانند ایجاد ترانشه برای ساخت‌وساز جاده‌ها و شهرسازی بر فراوانی وقوع زمین‌لغزش تأثیرگذار است (برا و همکاران[4]، ۲۰۱۹؛ یمانی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ به‌عبارت‌دیگر روابط فضایی موجود بین منطقه وقوع زمین‌لغزش و عوامل مؤثر محیطی، عناصر کلیدی در بررسی حساسیت زمین‌لغزش می‌باشند (سامودرا و همکاران[5]، ۲۰۱۸). با توجه به اینکه زمین‌لغزش‌ها نسبت به سایر بلایای طبیعی مدیریت‌پذیرتر هستند، شناخت این پدیده در جهت جلوگیری از خسارات ناشی از آن از اهمیت زیادی برخوردار است (لانتادا و همکاران[6]، ۲۰۰۹). ازاین‌رو شناخت نواحی مستعد وقوع زمین‌لغزش و

1. Brabb
2. Hattanji and Moriwaki
3. Basu and Swades
4. Bera et al.
5. Samodra et al.
6. Lantada et al.

حرکات توده‌ای از ضـــروریات مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی توســـعه‌ای و عمرانی اســـت (یامین و همکاران[1]، ۲۰۰۵).

کشـور ایران با توجه به شـرایط آب‌وهوایی و توپوگرافی ازجمله کشـورهایی است که وقوع زمین‌لغزش در مناطق مختلف آن باعث به وجود آمدن خسـارات انسـانی و مالی زیادی می‌شـود. به دلیل تعدد، تنوع، تکرار و شـدت رخداد خطرات طبیعی و ناآرامی محیط، ایران در ردیف کشـورهای بلاخیز جهان قرار گرفته اسـت (مقیمی و همکاران، ۱۳۹۱). تهیه نقشـــه‌های پهنه‌بندی زمین‌لغزش، برای طراحان و مهندســـان در راســـتای انتخاب مکان مناســـب اجرای طرح‌ها و همچنین برای مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی بســـیار حائز اهمیت اســـت (پرادهان[2]، ۲۰۱۱؛ نفســـلیوگلو و همکاران[3]، ۲۰۰۸). محققان زیادی از دهه‌های گذشـــته با به‌کارگیری روش‌های مختلف نسـبت به ارزیابی خطرات زمین‌لغزش و تهیه نقشــه توزیع فضــایی این پدیده اقدام نموده‌اند. در سـطح بین‌المللی، چن و همکاران[4] (۲۰۱۲)، دینامیک حرکات توده‌ای پیچیده ناشــی از بارش ســنگین در ناحیه داگوی ترکیه را مطالعه نمودند. تحلیل داده‌های بارش برای دوره‌های زمانی مختلف حاکی از این اســت که بارش ســنگین در زمین‌لغزش به‌عنوان یک عامل محرک نقش دارد. دی‌اریکو و مورو[5] (۲۰۱۲)، با اســتفاده از مدل قضــیه بیز جنوب منطقه تیرول در ایتالیا را به لحاظ وقوع زمین‌لغزش پهنه‌بندی نمود. نتایج نشــان داد که نقشه حساسیت به‌دست‌آمده با بیش از ۷۵ درصد لغزش‌ها انطباق دارد. شادمان و همکاران (۲۰۱۳)، با رویکرد تلفیقی FAHP و PROMETHEE II و با اســتفاده از ۸ لایه، حســاســیت زمین‌لغزش منطقه مینودشــت در شـرق اسـتان گلستان را پهنه‌بندی نمودند. نتایج نشان داد که ۱۱ درصد زمین‌لغزش‌ها در کلاس با حساسیت خیلی زیاد رخ داده‌اند. ژو و همکاران[6] (۲۰۱٤)، با اســـتفاده از منطق فازی، خطر زمین‌لغزش در منطقه کایژیان واقع در چین را پیش‌بینی نمودند. نتایج نشــان داد که منطق فازی توانایی بالایی در پیش‌بینی خطر زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه را داشـــته اســـت. روســتایی و همکاران (۱۳۹۳)، به ارزیابی پتانســیل وقوع زمین‌لغزش در منطقه ســد مخزنی قلعه چای عجب‌شـیر با اسـتفاده از فرایند تحلیل شـبکه‌ای (ANP) و روش چندمعیارهٔ مکانی پرداختند. نتایج نشان داد که کاربری اراضـی، طبقات ارتفاعی و جهت دامنه نقش مهمی در وقوع زمین‌لغزش دارد. شکاری بادی (۱۳۹٤)، با تلفیق روش‌های فرایند تحلیل شــبکه و شــاخص آنتروپی شــانون عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های حوضــه فاروب نیشــابور را شـناسـایی و ارزیابی نمود. نتایج نشـان داد که عامل فاصله از آبراهه به‌عنوان مؤثرترین عامل بوده است. نظم‌فر و بهشتی جـاوید (۱۳۹۵)، با اســـتفاده از مدل ترکیبی فرایند تحلیل شـــبکه و منطق فازی حوضـــه آبریز چلی‌چای را به لحاظ حســـاســـیت وقوع زمین‌لغزش موردبررســـی قرار دادند و نتیجه گرفته‌اند که مدل مذکور برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش

1. Yamin et al.
2. Pradhan
3. Nefeslioglu et al.
4. Chen et al.
5. D’Errico and Murru
6. Zho et al.

مناسب است. عابدینی و همکاران (۱۳۹۵)، بخشی از حوضه آبریز اهرچای را با استفاده از فرایند تحلیل شبکه و قضیه بیز به لحاظ وقوع زمین‌لغزش موردبررسی قرار داده‌اند و نتیجه گرفته‌اند که دقت ترکیب این دو روش برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش بسیار خوب و به میزان ۷۱ درصد بوده است. رنجبری و همکاران (۱۳۹۸)، خطر وقوع زمین‌لغزش پهنه گسلی قوشاداغ- ارسباران در آذربایجان شرقی را با استفاده از مدل ANP و LR پهنه‌بندی نموده‌اند. نتایج نشان داد که عامل فاصله از گسل و بارش بیشترین نقش و کاربری زمین کمترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش‌ها داشته‌اند. بااین‌حال، تاکنون مطالعات زیادی در خصوص زمین‌لغزش انجام شده است که هرکدام جنبه‌های مختلف این پدیده را بررسی نموده و پهنه‌های خطر را برای مناطق موردمطالعه مشخص نموده‌اند (برای مثال: میلچوری و تریگواسون[1]، ۲۰۱۵؛ چن و همکاران[2]، ۲۰۱۶؛ باسو و سادس، ۲۰۱۹؛ محمدخان و همکاران، ۱۳۹۳؛ روستایی و همکاران، ۱۳۹٤؛ مقصودی و همکاران، ۱۳۹٤؛ صفاری و هاشمی، ۱۳۹۵؛ پیش‌نماز احمدی و همکاران، ۱۳۹۷؛ شاهکوئی و همکاران، ۱۳۹۸؛ مجد باوی و مومی پور، ۱٤۰۰).

در پژوهش حاضر سعی شده است با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل شبکه[3] و احتمالات شرطی (قضیه بیز)[4]، عرصه‌های آسیب‌پذیر و بخش‌های حساس منطقه کلور که بیشترین احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش در آن‌ها وجود دارد، شناسایی و بررسی گردد. منطقه کوهستانی کلور در شهرستان خلخال (بخش علیای رودخانه شاهرود) قرار دارد و با توجه به شرایط زمین‌شناسی، نئوتکتونیکی، اقلیمی و توپوگرافی مستعد وقوع انواع مختلفی از حرکات دامنه‌ای است. در این منطقه که یکی از چشم‌اندازهای قابل‌توجه آن بقایای سولیفلوکسیون‌های قدیمی است، بر اساس بررسی‌های میدانی به عمل آمده، در زمان حاضر نیز زمین‌لغزش‌های متعددی به وقوع پیوسته است. مطالعه این زمین‌لغزش‌ها و پهنه‌بندی پتانسیل خطر وقوع آن در منطقه برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهره‌برداری اصولی از اراضی و کاهش مخاطرات محیطی بسیار ضروری و حائز اهمیت است که هدف اصلی این تحقیق می‌باشد.

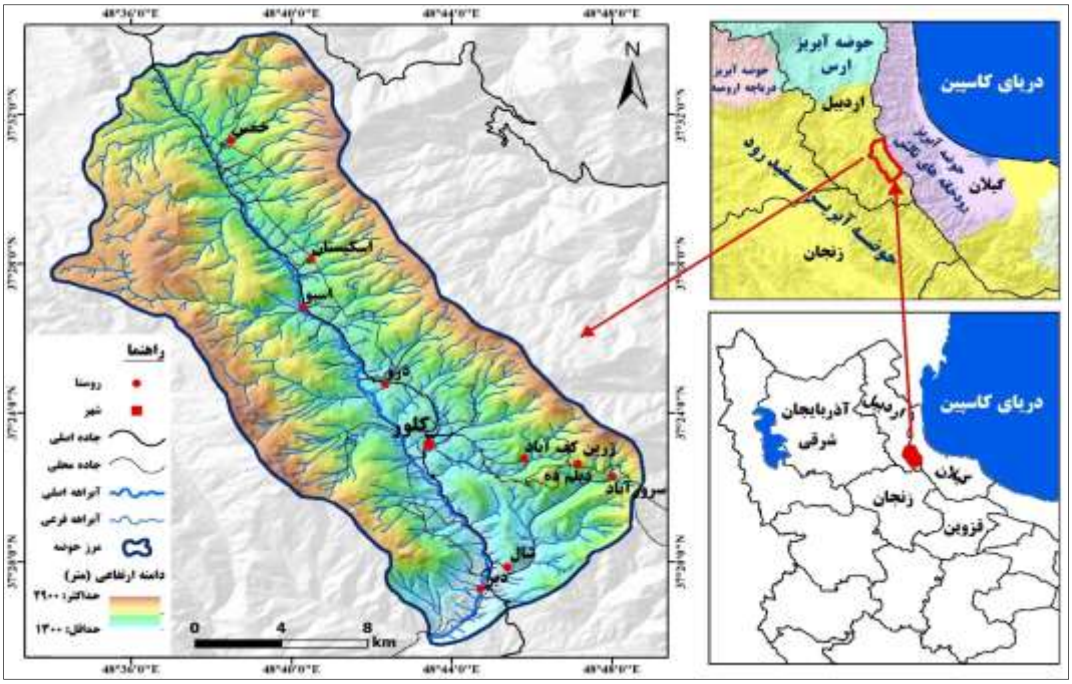
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در بخش غربی رشته‌کوه البرز و جنوب شرقی شهرستان خلخال واقع شده است. مرز منطقه موردمطالعه منطبق با مرز حوضه آبریز بالادست رودخانه شاهرود به‌عنوان یکی از سرشاخه‌های رودخانه سفیدرود است که درنهایت به دریای مازندران ختم می‌شود (شکل ۱). کمینه و بیشینه ارتفاعی منطقه به ترتیب ۱۳۰۰ و ۲۹۰۰

1. Melchiorre & Tryggvason
2. Chen et al.
3. Analysis Network Process
4. Conditional probabilities (Bayes theorem)

متر و همچنین میانگین ارتفاعی آن از سـطح دریا ۲۰۸۸ متر اسـت که از سمت شرق به ارتفاعات تالش، از سمت غرب به کوه آق‌داغ و از سـمت شـمال به کوه دره‌دران منتهی می‌شـود. آب‌وهوای منطقه موردمطالعه در تابسـتان معتدل و در زمسـتان سـرد اسـت. به‌طورکلی رژیم بارش در منطقه کلور مدیترانه‌ای اسـت و میانگین بارش سـالانه آن (بر اسـاس داده‌های سـازمان هواشـناسـی کشـور) در حدود ۳۵۰ میلی‌متر اسـت (کمینه ۳۲۰ و بیشـینه ۳۸۰ میلی‌متر). توپوگرافی منطقه بیانگر قرارگیری آن در منطقه‌ای کوهسـتانی و پرشـیب اسـت. بر اسـاس نقشـه‌های زمین‌شـناسـی ۱:۱۰۰۰۰۰ (سـازمان زمین‌شـناسـی، شیت‌های خلخال و ماسوله) لیتولوژی غالب منطقه شامل انواع لایه‌های آهکی همراه با سیلت و ماسـه‌سنگ است که تحت تأثیر فعالیت‌های تکتونیکی دارای درز و شکستگی‌های زیاد و تحت تأثیر نوسانات دمایی توأم با رطوبت، تخریب مکانیکی شدیدی را متحمل شده‌اند.



شکل ۱- موقعیت منطقه موردمطالعه

۲-۲- داده‌های پژوهش

در این پژوهش، ابتـدا زمین‌لغزش‌هـای رخ‌داده در منطقه کلور با اســتفاده عکس‌های هوایی تصــاویر ماهواره‌ای، مشـاهدات میدانی و تعیین موقعیت با اسـتفاده از GPS، شناسایی گردید. در ادامه، با توجه به ویژگی‌های زمین‌لغزش‌ها، شـرایط طبیعی و مورفومتری حوضـه، نتایج پژوهش‌های گذشـته و روش‌های مورد استفاده در تحقیق، ۹ عامل مؤثر در

رخداد زمین‌لغزش‌های حوضه کلور شناسایی شد و داده‌های مربوطه شامل لیتولوژی، کاربری اراضی، بارش، شیب، جهت شیب، فاصله از جاده، فاصله از گسل و فاصله از آبراهه و ارتفاع تهیه و مورد استفاده قرار گرفتند.

داده‌های لیتولوژیکی و گسل از نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ برگ‌های ماسوله و خلخال (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی) تهیه گردید. داده‌های شیب و جهت شیب منطقه با استفاده از DEM ده متر (سازمان نقشه‌برداری کشور) در نرم‌افزار ArcGIS و با استفاده از ابزارهای Slope و Aspect در Spatial Analyst تهیه شده است. جهت بررسی پارامترهای مربوط به بارندگی از دوره آماری ۱۳۷۷ تا ۱۳۹۷ (سازمان هواشناسی کشور) استفاده گردید. با استفاده از ارقام میانگین سالانه بارندگی و ارتفاع ایستگاه‌های منطقه، متوسط بارندگی در کل منطقه محاسبه و نقشه هم بارش کلور در محیط نرم‌افزار ArcGIS تهیه شد. داده‌های کاربری اراضی منطقه موردمطالعه، ابتدا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و پردازش داده‌های چندطیفی تصاویر ماهواره‌ای سپس با انجام پیمایش‌های میدانی و استفاده از اطلاعات موجود در مرکز تحقیقات و منابع طبیعی اردبیل تهیه گردید. شبکه زهکشی منطقه از طریق مدل‌سازی هیدرولوژیکی و با استفاده از DEM ده متر در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج گردید. جاده‌های منطقه با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ (سازمان نقشه‌برداری کشور) استخراج و ترسیم شد.

۲-۳- روش‌های پژوهش

پس از جمع‌آوری و آماده‌سازی داده‌های تحقیق، هر یک از عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش‌های منطقه به‌صورت لایه‌های اطلاعاتی در محیط نرم‌افزار ArcGIS ترسیم و بر اساس مدل‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و قضیه بیز، پارامترهای هرکدام از عوامل مؤثر در رخداد زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه، ارزش‌گذاری و برای مدل‌سازی و انجام تحلیل‌های فضایی پردازش شدند.

در این پژوهش، برای مقایسه زوجی و تعیین ضریب پارامترها از مدل فرآیند تحلیل شبکه (ANP) و برای تعیین سطح تأثیر کلاس‌های هر پارامتر از مدل احتمالات شرطی (قضیه بیز) استفاده شده است. برای اجرای مدل ANP ابتدا بر اساس ماهیت داده‌ها و ارتباطات موجود بین آن‌ها، پارامترها در چهار خوشه اصلی ۱) پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی؛ ۲) پارامترهای زمین‌شناسی؛ ۳) پارامترهای انسانی و پوشش زمین و ٤) پارامترهای ژئومورفولوژیکی دسته‌بندی شدند. در ادامه با مشخص شدن خوشه‌ها، ساختار شبکه‌ای بین خوشه‌ها و پارامترهای در نظر گرفته شده، تشکیل شد. تمامی مراحل مربوط به مقایسه‌های زوجی بین خوشه‌ها معیارها و روابط درونی آن‌ها در محیط نرم‌افزار Super Decision صورت گرفته و نتایج کار به‌صورت جدول ابرماتریس غیر وزنی؛ ابرماتریس وزنی و ابرماتریس حدی مشخص شده است. پس از محاسبه وزن پارامترها و تشکیل ابر ماتریس‌های سه‌گانه (ابرماتریس غیروزنی، ابرماتریس وزنی و ابرماتریس حدی) وزن کلاس‌های مختلف هر پارامتر با استفاده از قضیه بیز محاسبه گردید. برای این منظور از اطلاعات مربوط به زمین‌لغزش‌های رخداده در منطقه و پارامترهای کلاس‌بندی استفاده شده است.

درنهایت با اعمال وزن‌های مربوط به کلاس‌های پارامترهای مختلف که با استفاده از قضیه بیز حاصل شده و نیز اعمال ضرایب حاصل از ANP، در محیط نرم‌افزار ArcGIS این وزن‌ها بر روی پارامترها و کلاس‌های مربوط به هرکدام از پارامترها اعمال گردید. در این پژوهش جهت ارائه مدل نهایی از عملگر Raster Calculator به دلیل دقت بیشتر استفاده گردیده و خروجی به دست آمده بر اساس شکست‌های طبیعی، نمودار فراوانی پیکسل‌ها و با هدف مقایسه نتایج به ۵ کلاس خطر (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد) تقسیم گردید و نقشه نهایی پهنه‌بندی زمین‌لغزش منطقه کلور ارائه و مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفت.

به‌منظور تخمین میزان دقت و صحت سنجی نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر، پراکنش زمین‌لغزش‌ها با نقشه پهنه‌بندی تطبیق و روی هم‌گذاری شد و درصد رخداد زمین‌لغزش در هرکدام از پهنه‌ها به دست آمد. درنهایت، با استفاده از رگرسیون خطی، نتایج مورد صحت سنجی قرار گرفت.

۲-۳-۱- فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP)

فرایند تحلیل شبکه‌ای از مجموعه مدل‌ها و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد. کار اصلی این مدل، تعیین ارزش و اهمیت معیارها و شاخص‌ها و درنهایت ارزش نهایی گزینه‌های تصمیم‌گیری است. فرایند تحلیل شبکه‌ای به این منظور توسعه‌یافته است که بدون در نظر گرفتن فرضیه‌هایی درباره رابطه سلسله مراتبی یک‌طرفه بین سطوح تصمیم، شرایط واقعی‌تری را برای تصمیم‌گیری فراهم آورد (نیاپان و پیانتانکولاچی[1]، ۲۰۰۶). این مدل توسط ال ساعتی در سال ۱۹۹۶ به دنبال محدودیت‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP) در حل مسائل و ارزیابی اهمیت تجمعی کلی شاخص‌های درون یک مدل ارزیابی با ترکیب ارتباطات و بازخوردها موجود در یک سیستم تصمیم‌گیری ارائه شد (روستایی و همکاران، ۱۳۹٤).

۲-۳-۲- مدل قضیه بیز یا وزن شواهد[2]

مدل وزن شواهد به‌عنوان مدلی سودمند بر پایه یک روش آماری مبتنی بر تئوری احتمالات بیز است (دنیسون[3]، ۲۰۰۲). این مدل برای ارزیابی حساسیت وقوع زمین‌لغزش، اولین بار در سال ۲۰۰۲ توسط ون وسترن مورد استفاده قرار گرفته است. در این مدل بر اساس دو دسته اطلاعات شامل ۱) پارامترهای مؤثر در وقوع یک پدیده (زمین‌لغزش) یا عامل‌های سببی (فاکتورهای مستعد کننده زمین‌لغزش)؛ ۲) سطح وقوع پدیده در گذشته (زمین‌لغزش‌های رخداده) کار مدل‌سازی و پیش‌بینی صورت می‌گیرد. در این حالت احتمال وقوع زمین‌لغزش در آینده بستگی به شرایطی دارد که هنگام وقوع آن در گذشته وجود داشته است. در این پژوهش از مدل قضیه بیز برای پیدا کردن سطح تأثیر و وزن

1. Neaupane & Piantanakulchai
2. Weight of evidence (WofE)
3. Denison

هرکدام از کلاس‌های پارامترهای مستعد کننده زمین‌لغزش استفاده شده است. با توجه به مطالب فوق، فرمول قضیه بیز بر اساس رابطه زیر (رابطه ۱) تعریف می‌شود.

رابطه (۱)
$$P(s \mid B_i) = \frac{P(B_i \mid S) \times P(s)}{P(B_i)}$$

در رابطه‌ی فوق P(S) احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده موردمطالعه (AS) و $P(B_i)$ احتمال وقوع کلاس B در محدوده‌ی موردمطالعه، (AS)، P(Bi | s) احتمال وقوع پیشامد Bi به شرطی که پیشامد S اتفاق افتاده باشد، (S || P (Bi: احتمال وقوع پیشامد S به شرطی که پیشامد B اتفاق افتاده باشد. احتمال شرطی وقوع زمین‌لغزش زمانی که کلاس Bi اتفاق نیفتاده باشد نیز به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود:

رابطه (۲)
$$P(s \mid B_i^{\wedge}) = \frac{P(B_i^{\wedge} \mid S) \times P(s)}{P(B_i^{\wedge})}$$

در معادله‌ی فوق P(S) احتمال اولیه وقوع پیشامد S در محدوده موردمطالعه $P(B^{\wedge}_i \mid s)$ احتمال شرطی نبود کلاس Bi به شرطی که S اتفاق افتاده باشد، احتمال اولیه نبود کلاس Bi در محدوده موردمطالعه (AS). در این مدل، وزن کلاس‌های هر پارامتر به‌وسیله ترکیبی از ارزش‌های مثبت و منفی (W^+ و W^-) از طریق تئوری بیز و نیز اختلاف تفاضل بین آن‌ها محاسبه می‌شود و درنهایت با استفاده از روابط ۳ تا ٦ وزن نهایی کلاس‌های مربوط به هر پارامتر محاسبه می‌شود.

$$W^+ = \mathrm{LN}(\mathrm{P}(B_i|s)/P(B_i))$$ رابطه (۳)

$$W- = LN(P(B_i^{\wedge}|s)/P(B_i^{\wedge}))$$ رابطه (٤)

$$C = W^+$$ رابطه (۵)

$$W_{final} = C/S_c$$ رابطه (٦)

که در آن LN لگاریتم بر مبنای عدد نپر، C تفاضل وزن‌های مثبت و منفی، W_{final} وزن نهایی استاندارد شده و S_C انحراف استاندارد است (جذر واریانس هر یک از وزن‌های مثبت و منفی) (پور قاسمی و همکاران، ۱۳۹۱).

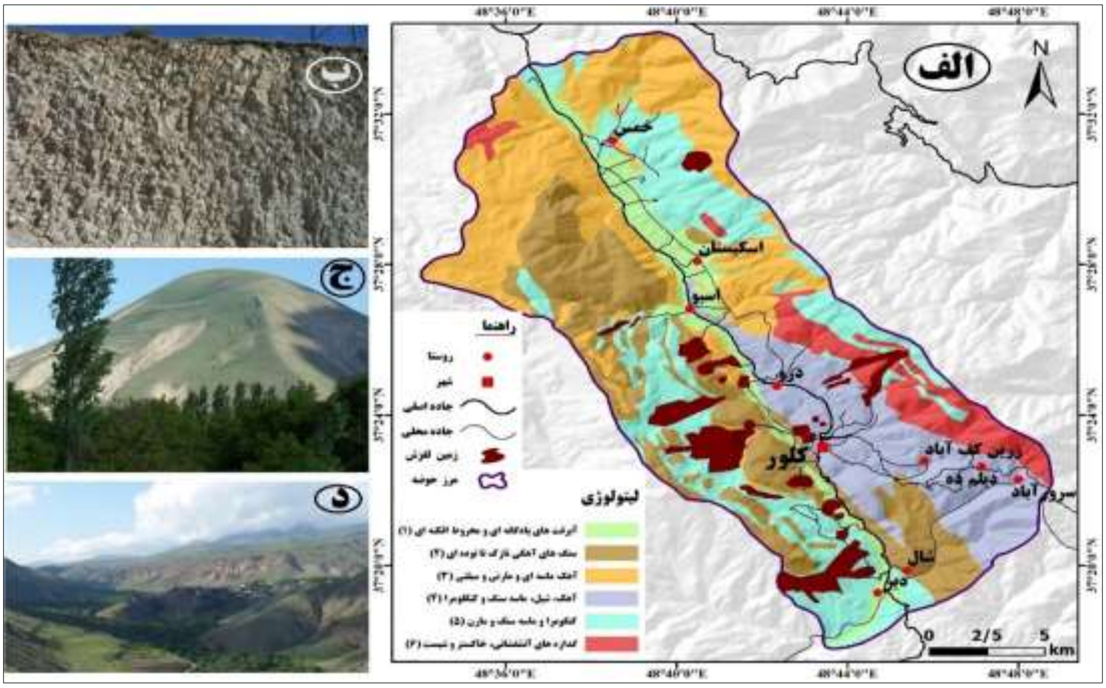
جهت بررسی و تحلیل پراکنش زمین‌لغزش‌ها نسبت به عوامل مؤثر و هریک از رده‌های این عوامل، ابتدا مساحت کل منطقه موردمطالعه، مساحت کل پهنه‌های لغزش یافته و مساحت هریک از کلاس‌ها برای تمامی عوامل مؤثر محاسبه گردید. سپس با تلاقی نقشه پراکنش زمین‌لغزش‌ها با عوامل، مساحت پهنه‌های لغزش یافته برای تمامی کلاس‌ها محاسبه گردید. لازم به ذکر است که تمام محاسبات فوق در محیط نرم‌افزار ArcGIS و بر روی لایه‌های کلاس‌بندی شده عوامل مؤثر صورت گرفته است. در مرحله بعد، درصد مساحت کلاس‌های هر عامل و درصد سطح لغزش یافته آن‌ها به‌صورت زیر محاسبه گردید:

رابطه (۷)
$$\text{درصد مساحت هر کلاس} = \frac{\text{مساحت کلاس}}{\text{مساحت کل منطقه}} * 100$$

رابطه (۸)
$$\text{درصد لغزش‌ها در هر کلاس} = \frac{\text{مساحت لغزش‌های کلاس}}{\text{مساحت کل لغزش‌ها}} * 100$$

۳- نتایج و بحث

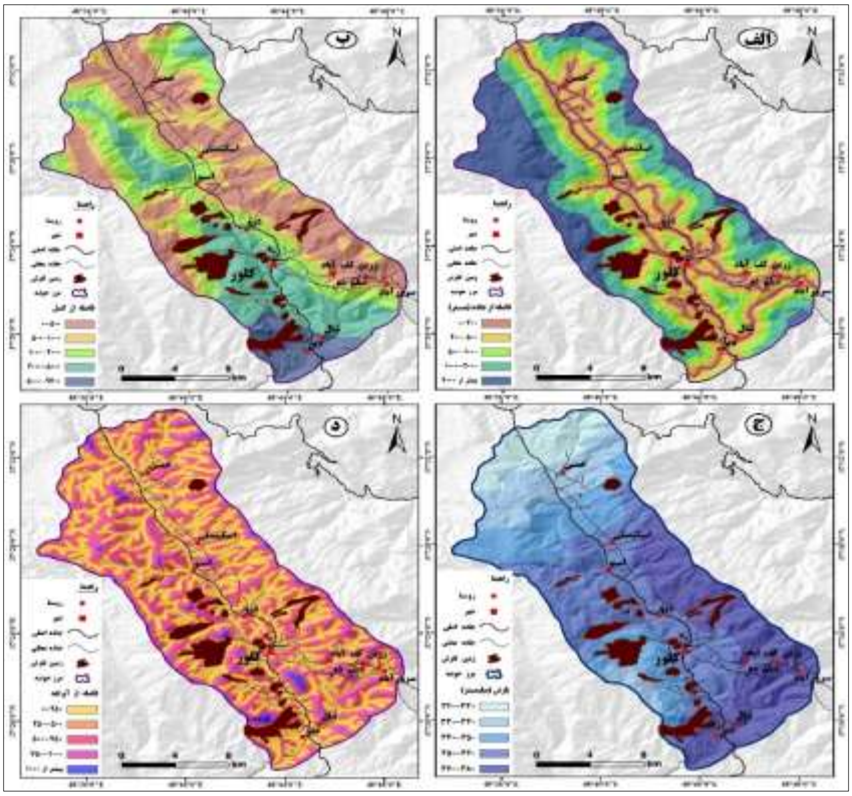
نتایج حاصل از کار میدانی، بررسی الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های رخ‌داده، وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از مدل ANP و قضیه بیز در شکل‌های ۲ الی ٤ و جدول ۱ و ۲ ارائه شده است. بر اساس شکل ۲ بیشترین مساحت واحدهای سنگ‌شناسی آهک ماسه‌ای و مارنی و سیلتی و همچنین سنگ‌های آهکی نازک تا توده‌ای با مساحت ۱۳۱/۱٦ کیلومترمربع (٤٤/٨٥ درصد از منطقه)؛ شیل و ماسه‌سنگ سازند شمشک با مساحت ۷۲/٤٤ کیلومترمربع (۲٤/٦ درصد مساحت منطقه)؛ کنگلومرا و ماسه‌سنگ و مارن با مساحت ۵۸/۹۳ کیلومترمربع (۲۰/۰۸ درصد از منطقه) و واحد آهک، شیل، ماسه‌سنگ و کنگلومرا با مساحت ٤۷/۱۵ کیلومترمربع (۱٦/۰۷ درصد از منطقه) گسترده‌ترین سازندهای موجود هستند. مقایسه سازندهای زمین‌شناسی نسبت به وقوع زمین‌لغزش نشان می‌دهد، دو سازند اولی که دارای مارن و سیلت هستند، بیشترین رخداد زمین‌لغزش را داشته‌اند. بااین‌حال، در سایر سازندها مانند سازندهای آتشفشانی نیز سطوح لغزشی مشاهده می‌شود که به دلیل وجود رسوبات آواری و شیب زیاد منطقه است. درمجموع، توده‌های آهکی مارنی و ماسه‌ای و همچنین ماسه‌سنگ و مارن در جنوب غرب منطقه بیشترین نقش را در وقوع زمین‌لغزش داشته‌اند (شکل ۲ – الف تا د). نتایج تعیین وزن کلاس‌های عامل سنگ‌شناسی بر اساس قضیه بیز نیز نشان داد که سازندهای طبقه ۵ و ۳ (شکل ۲ و جدول ۱) به ترتیب با ۲۰/۸۸ و ۱۹/۷ بیشترین وزن را دریافت کردند و در مقابل سازندهای آبرفتی (طبقه ۱) کمترین وزن را کسب کردند.



شکل ۲- الف) الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه کلور در ارتباط با واحدهای لیتولوژیکی؛ ب) لایه‌های آهک ماسه‌ای و سیلتی خرد شده و درز و شکاف دار در انتهای دره کلور؛ ج) لغزش در دامنه پرشیب در منطقه کلور؛ د) نمایی از دره کلور و دامنه‌های لغزشی آن

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیشترین زمین‌لغزش‌های اتفاق افتاده در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر (کلاس‌های ۰ تا ۲۰۰ متر و ۲۰۰ تا ۵۰۰ متر) جاده‌ها واقع هستند (شکل ۳-الف). گرچه در وقوع زمین‌لغزش‌های بزرگ قبلی جاده‌سازی نقش کمتری داشته ولی به علت نزدیکی این جاده‌ها با دامنه‌های مستعد لغزش اغلب در معرض تهدید هستند و توسعه غیراصولی آن‌ها سبب تشدید لغزش در آینده خواهد شد. علاوه بر این، از نظر فاصله از گسل، بیشترین زمین‌لغزش‌ها در فاصله کمتر از ۵۰۰۰ متر و عمدتاً در فاصله ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر رخ داده‌اند. نزدیک‌ترین گسل موجود در محدوده موردمطالعه، گسل کلور با سازوکار معکوس است. گسل مذکور در قسمت‌های جنوبی و غربی منطقه باعث راندگی سازند شمشک نیز شده است (شکل ۳-ب). همچنین از نظر میزان بارش بیشترین زمین‌لغزش‌ها در دامنه بارشی ۳۳۰ تا ۳۵۰ میلی‌متر واقع هستند (شکل ۳-ج). درنهایت، از نظر فاصله از رودخانه نیز بیشترین سطوح لغزشی در فاصله کمتر از ۵۰۰ متر آبراهه‌ها به وقوع پیوسته‌اند (شکل ۳-د). نتایج تعیین وزن کلاس‌های عوامل فاصله از جاده، فاصله از گسل، میزان بارش و فاصله از آبراهه‌ها بر اساس قضیه بیز نیز نشان داد که فاصله ۰ تا ۲۰۰ متر از جاده با وزن ۲۳/۲۴، فاصله ۰ تا ۵۰۰ متر از گسل با وزن ۴۷/۱۳، میزان بارش ۳۶۰ تا

۳۸۰ با وزن ۱۸/۶۵ و فاصــله ۰ تا ۲۵۰ متر از آبراهه با وزن ۲۶/۸ بیشــترین وزن را در میان کلاس‌های هر عامل به خود اختصاص دادند (جدول ۱).



شکل۳- الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه کلور در ارتباط با عوامل مؤثر: الف) فاصله از جاده؛ ب) فاصله از گسل؛ ج) بارش؛ د) فاصله از آبراهه

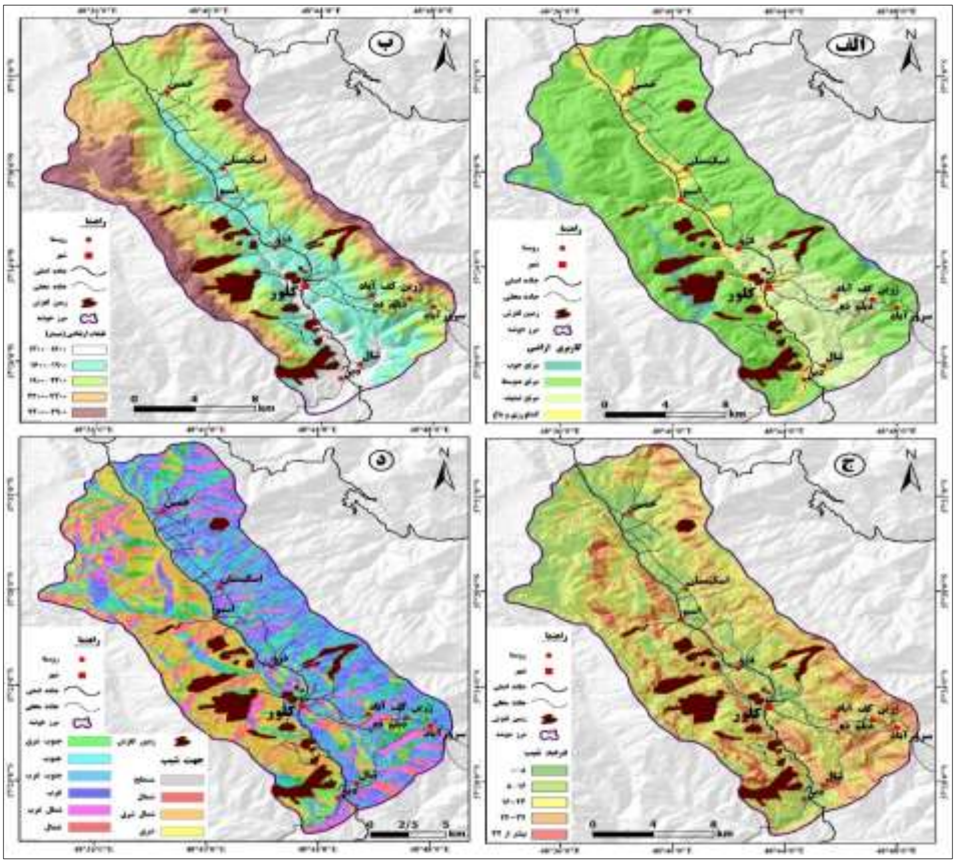
جدول ۱- اطلاعات مربوط به وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از قضیه بیز

پارامتر	طبقه	W^{+}	W^{-}	C	$S2(W^{+})$	$S2(W^{-})$	S_C	W_{final}
سنگ‌شناسی	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
	۲	۱/۰۰۳۲	−۰/۰۹۸۵	۱/۱۰۱۷	۰/۰۰۸۵۲	۰/۰۰۰۲۴۵	۰/۰۹۳۶	۱۱/۷۷
	۳	۰/۹۹۸	−۱/۰۳۶	۲/۰۳۴	۰/۰۰۹۸	۰/۰۰۰۸۷۴	۰/۱۰۳۳	۱۹/۷
	٤	۰/۸۷٤	−۰/۰۰۹۸۵	۰/۸۸۳۸۵	۰/۰۰۵۲	۰/۰۰۰۸۶	۰/۰۷۷۸٤	۱۱/۳۵
	۵	۰/۸۵۷	−۰/۰٤۷۱	۰/۹۰٤۱	۰/۰۰۱۲۵	۰/۰۰۰۶۲۵	۰/۰٤۳۳	۲۰/۸۸
	٦	۰/۷٤۱	−۰/۰۵۸۹	۰/۰۷۹۹۹	۰/۰۰٤۳۲	۰/۰۰۲۳۶	۰/۰۶۲۵.	۱/۲۸۸
فاصله از آبراهه (متر)	۰ − ۲۵۰	۰/۳۸۷	−۱/۰۲۵	۱/٤۱۲	۰/۰۰۲۲۲	۰/۰۰۰۵۵۵	۰/۰۵۲۶۷	۲۶/۸
	۲۵۰ − ۵۰۰	۰/۳۸۵	−۰/۰۹۵	۰/٤۸	۰/۰۰٤۲۳	۰/۰۰۰۷۶۶	۰/۰۷۰۶	٦/۸

پارامتر	طبقه	W^{+}	W^{-}	C	$S2(W^{+})$	$S2(W^{-})$	S_C	W_{final}
	۵۰۰ – ۷۵۰	۰/۴۹۹	-۰/۲۰۲	۰/۶۵۱	۰/۰۰۹۱۷	۰/۰۰۲۳۷	۰/۱۰۷۴	۶/۰۶
	۷۵۰ – ۱۰۰۰	۰/۶۸۴	-۰/۰۹۵	۰/۷۷۹	۰/۰۸۳۳	۰/۰۰۳۳۹	۰/۲۹۴۴	۲/۶۴
	بیشتر از ۱۰۰۰	۰/۸۱۱	-۰/۰۶۲۵	۰/۸۷۳۵	۰/۶۷۲	۰/۰۳۶۷	۰/۸۴۲	۱/۰۳
فاصله از جاده (متر)	۰ – ۲۰۰	۰/۹۶۵	-۱/۰۰۲۵	۱/۹۶	۰/۰۰۶۳۸	۰/۰۰۰۷۳۳	۰/۰۸۴۳۳	۲۳/۲۴
	۲۰۰ – ۵۰۰	۰/۲۵۸	-۰/۰۳۵۷	۰/۲۹۳۷	۰/۰۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۷۲	۰/۰۲۵۵	۱۱/۵۱
	۵۰۰ – ۱۵۰۰	۰/۵۲۴	-۰/۰۰۸۵۲	۰/۵۳۲۵	۰/۰۰۵۸	۰/۰۰۰۰۸۳۱	۰/۰۷۶۷	۶/۹۴
	۱۵۰۰ – ۲۰۰۰	۱/۰۱۲۴	-۰/۳۵۱	۱/۳۷۵	۰/۰۷۸۹	۰/۰۰۷۷۷۱	۰/۲۹۴۴	۴/۶۷
	بیشتر از ۲۰۰۰	۰/۹۸۷۵	-۰/۰۸۹۴	۱/۰۷۷	۰/۰۵۵۵	۰/۰۰۴۶۷	۰/۲۴۵۳	۴/۴
فاصله از گسل (متر)	۰ – ۵۰۰	۰/۸۸۸۱	-۰/۱۲۸۵	۱/۰۱۲	۰/۰۰۰۳۷	۰/۰۰۰۰۹۱	۰/۰۲۱۴۷	۴۷/۱۳
	۵۰۰ – ۱۰۰۰	۰/۷۱۵	-/۰۹۸	۰/۸۱۳	۰/۰۰۰۷۳۴	۰/۰۰۰۰۸۸	۰/۰۲۸۶۷	۲۸/۳۵
	۱۰۰۰ – ۲۰۰۰	۱/۰۰۰۳	-۰/۶۶۶	۱/۶۶۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۰۷۸	۰/۰۶۷۶	۲۴/۶۴
	۲۰۰۰ – ۵۰۰۰	۰/۶۵۰	-۰/۰۸۵۶۲	۰/۷۳۵۶	/۰۰۰۴۴۴	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۳۱۶	۲۲/۸
	۵۰۰۰–۹۷۰۰	۰/۶۸۷۴	-۰/۰۹۸۵۴	۰/۷۸۶	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۶۵	۰/۰۵۴۳	۱۴/۴۷
بارش	۳۲۰ – ۳۳۰	۰/۰۵۶	-۰/۰۰۴۱	۰/۰۶۰۱	۰/۰۰۰۳۷۸	۰/۰۰۰۰۴	۰/۰۲۰۴۴	۲/۹۴
	۳۳۰ – ۳۴۰	۰/۰۷۶	-۰/۰۰۹۵۱	۰/۰۸۵۵۱	۰/۰۰۰۷۴۳	۰/۰۰۰۰۶۲۷	۰/۰۲۸۳۸	۳/۰۱
	۳۴۰ – ۳۵۰	۱/۰۲۵	-۰/۱۱۱	۱/۱۳۶	۰/۰۰۵۱۴	۰/۰۰۰۰۹۸۳	۰/۰۷۲۳۷	۱۵/۷
	۳۵۰ – ۳۶۰	۱/۲۳	-۰/۱۶۵	۱/۳۹۵	۰/۰۰۶۵۱	۰/۰۰۰۷۵۱	۰/۰۸۵۲	۱۶/۳۷
	۳۶۰ –۳۸۰	۰/۹۵۲	-۰/۰۸۵۲	۱/۰۳۷۲	۰/۰۰۲۴۵	۰/۰۰۰۶۴۳	۰/۰۵۵۶۱	۱۸/۶۵

نتایج همچنین نشـان داد که از نظر کاربری اراضـی بیشـترین سطوح لغزشی در مراتع با پوشش متوسط و فقیر رخ داده اســت (شــکل ٤–الف). علاوه بر این، از نظر ارتفاع، بیشـــترین زمین‌لغزش‌ها در دامنه ارتفاعی ۱۶۰۰ الی ۱۹۰۰ متر اتفاق افتاده اســت (شــکل ٤–ب). همچنین از نظر میزان شــیب بیشــترین زمین‌لغزش‌ها در کلاس‌های شــیب ٢٤ تا ۳۲ درجه و بیشــتر از ۳۲ درجه به وقوع پیوســته‌اند (شــکل ٤–ج). درنهایت، از نظر جهات شــیب نیز بیشــترین ســطوح لغزشی در دامنه‌های با جهت شمالی و شمال شرقی رخ داده‌اند (شکل ٤–د).

نتایج تعیین وزن کلاس‌های عوامل کاربری اراضـی، ارتفاع، شـیب و جهت شـیب بر اسـاس قضیه بیز نیز نشان داد که مراتع فقیر با وزن ٢٤/٣٤، دامنه ارتفاعی ۱۳۰۰ الی ۱۶۰۰ با وزن ۱۸/۱۲، کلاس شـــیب ٢٤ تا ۳۲ درجه با وزن ٤٣/٧ و دامنه‌های با جهت شـــمال شـــرقی با وزن ٤٨/٧ بیشـــترین وزن را در میان کلاس‌های هر عامل را به خود اختصـــاص دادند (جدول ۲).



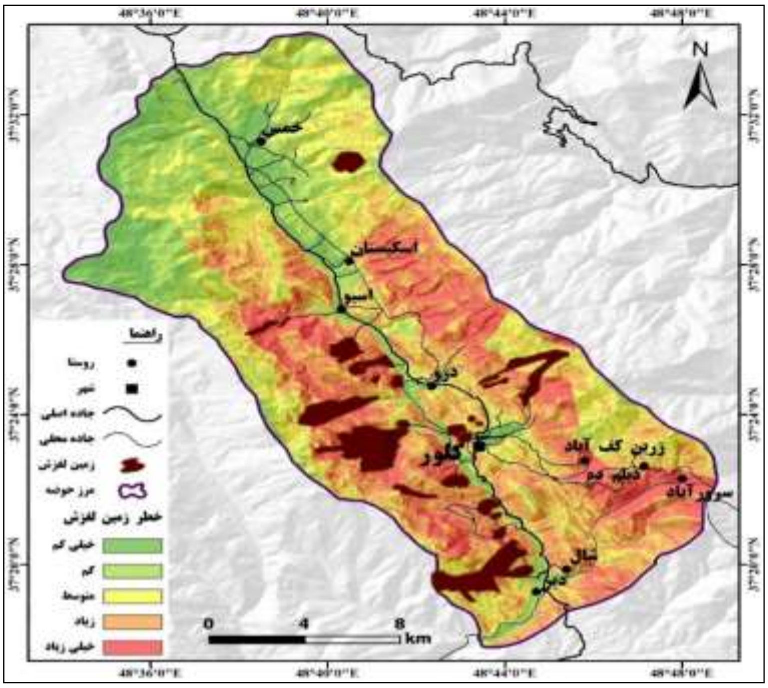
شکل ٤- الگوی مکانی زمین‌لغزش‌های منطقه کلور در ارتباط با عوامل مؤثر: الف) کاربری اراضی، ب) ارتفاع، ج) شیب، د) جهت شیب

جدول ۲- اطلاعات مربوط به وزن کلاس‌های مؤثر هر عامل با استفاده از قضیه بیز (ادامه جدول ۱)

پارامتر	طبقه	W^+	W^-	C	$S2(W^+)$	$S2(W^-)$	S_C	W_{final}
کاربری اراضی	مراتع فقیر	۱/۵۲۳	−۰/۰۰۹۵	۱/۵۳۲	۰/۰۰۳۳۳	۰/۰۰۰۶۳۲	۰/۰۶۲۹٤	۲٤/۳٤
	مراتع متوسط	۱/۰۰٦۳	−۰/۰۵٤۷	۱/۰٦۱	۰/۰۱۹٤۹	۰/۰۰٦۲۱	۰/۱٦۰۳	٦/٦۱
	مراتع خوب	۱	−۰/۰۰۲۵۷	۱/۰۰۲	/۰۱۹۵۲	۰/۰۰۷۹۱	۰/٤۵۰٦	۲/۲
	باغ	۰/۰٦۷	−۰/۰۰٤۵	۰/۰۷۱۵	۰/۰۰۱۱۲	۰/۰۰۰۰۵۳۷	۰/۰۳۵٤	۲
ارتفاع (متر)	۱۳۰۰ – ۱٦٦۰	۰/۹۸۵	−۱/۰۰۲۵	۱/۹۸۷	۰/۰۰۷۸۲	۰/۰۰٤۳	۰/۱۰۹٦	۱۸/۱۲
	۱٦٦۰ – ۱۹۰۰	۰/۸٤۲۰	−۰/۰٤٤۳	۰/۸۸٦	۰/۰۰۳٤۵	۰/۰۰۰٦۷۱	۰/۰٦٤۲	۱۳/۸
	۱۹۰۰ – ۲۱۵۰	۰/۰۵۲	−۰/۰۲۸	۰/۰۸	۰/۰۰۰۵۱۲	۰/۰۰۰۰٤۳۹	۰/۰۲۳۵۷	۳/٤
	۲۱۵۰ – ۲٤۰۰	۰/۰٦٤	−۰/۰۰۳۹	۰/۰٦۷۹	۰/۰۰۹۱۳	۰/۰۰۰٤٤٤	۰/۰۹۷۸	۰/٦۹٤
	۲٤۰۰ – ۲۹۰۰	۰/۰۷۱۲	−/۰۰۳۵	۰/۰۷٤۷	۰/۰۰۸۱۱	۰/۰۰۰۳٦۲	۰/٤۱۲۵	۰/۰۳۰۸
شیب درجه	۰ – ۸	۰/۵۳۸	−۰/۲۲۳	۰/۷٦۱	۰/۰۰۱٤	۰/۰۰۰۰۷۹	۰/۰۳۸٤۵	۱۹/۷۹

پارامتر	طبقه	W +	W -	C	S2(W +)	S2(W -)	Sc	W final
	۸ – ۱۶	۰/۶۱۲	−۰/۱۶۲۳	۰/۷۷۵۲	۰/۰۰۳۷	۰/۰۰۰۹۶	۰/۰۶۸۲	۱۱/۳۷
	۱۶ – ۲۴	۰/۵۸۶	−۰/۱۱۲۵	۰/۶۹۸۵	۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۰۸۵	۰/۰۵۶۱۲	۱۲/۴۴
	۲۴ – ۳۲	۰/۵۱۰	−۰/۱۸۷۵	۰/۶۹۷۵	۰/۰۰۰۱۷	۰/۰۰۰۰۸۵	۰/۰۱۵۹۶	۴۳/۷
	بیشتر از ۳۲	۰/۶۲۱۴	−۰/۱۴۵۲	۰/۷۶۶۶	۰/۰۰۳۴۱.	۰/۰۰۰۴۵۲	۰/۰۷۸۵۲	۸/۹۹۷
جهت شیب	N	۰/۴۵۲	−۰/۵۲۷	۰/۹۷۹	۰/۰۰۰۳۵۱	۰/۰۰۰۱۲	/۰۲۱۷	۴۵/۱۱
	NE	۰/۶۸۳	−۰/۰۴۳۹	۰/۷۲۶۹	۰/۰۰۰۱۲۴	۰/۰۰۰۰۹۸۷	۰/۰۱۴۹۲	۴۸/۷
	E	۰/۷۰۸	۰/۰۴۶۲	۰/۷۵۴۲	۰/۰۰۹۸۲	۰/۰۰۰۰۹۲۵	۰/۰۹۹۵۶	۷/۵۷
	SE	۰/۶۵۲	−۰/۴۰۱	۱/۰۵۳	۰/۰۰۰۸۳۱	۰/۰۰۰۰۷۱۳	۰/۰۳	۳۵/۱
	S	۰/۸۵۷	−/۰۳۶۱	۰/۸۹۳۱	۰/۰۲۵۴	۰/۰۰۲۳	۰/۱۶۶۴	۵/۳۶
	SW	۰/۵۲۷	−۰/۰۲۹۷	۰/۵۵۶۷	۰/۰۰۸۵۴	۰/۰۰۰۳۶	۰/۰۹۴۳۴	۵/۹
	NW	۰/۲۵۸	−۰/۰۳۵۷	۰/۲۹۳۷	۰/۰۰۰۲۷۸	۰/۰۰۰۰۴۵۸	۰/۰۱۷۹۹	۱۶/۳۲
	W	۰/۳۲۵	−/۰۹۸۵۲	۰/۴۲۳۵	۰/۰۰۰۴۱۲	۰/۰۰۰۳۱	۰/۰۲۶۸۷	۱۵/۷۶
	Flat	۰/۹۴۸	−۰/۰۵۳۲	۱/۰۰۱۲	۰/۰۳۴۵	۰/۰۰۳۱۴	۰/۱۹۴۶	۵/۱۴

نتایج نهایی تعیین مناطق با خطر وقوع زمین‌لغزش در شکل ۵ نشان داده شده است. بر اساس شکل مذکور، پهنه‌های با خطر خیلی زیاد (۸۴/۱۹ کیلومترمربع) و زیاد (۷۴/۵۱ کیلومترمربع) به ترتیب حدود ۲۸/۶۹ و ۲۵/۴۰ درصد از منطقه موردمطالعه را شامل می‌شوند. علاوه براین، پهنه‌های با خطر متوسط حدود ۶۳/۲۹ کیلومترمربع برابر با ۲۱/۵۷ درصد از منطقه موردمطالعه را در بر گرفته‌اند. درنهایت، پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم نیز به ترتیب با مساحت ۲۹/۷۳ (۱۴/۲۱ درصد) و ۴۱/۶۸ کیلومترمربع (۱۰/۱۳ درصد)، دربرگیرنده کمترین سطح از منطقه موردمطالعه هستند؛ بنابراین، بیش از ۵۴ درصد از منطقه کلور (حوضه آبریز بالادست رودخانه شاهرود) دارای پتانسیل زیاد و خیلی زیاد وقوع زمین‌لغزش است که نیازمند توجه ویژه در برنامه‌ریزی‌های محیطی و توسعه‌ای است.

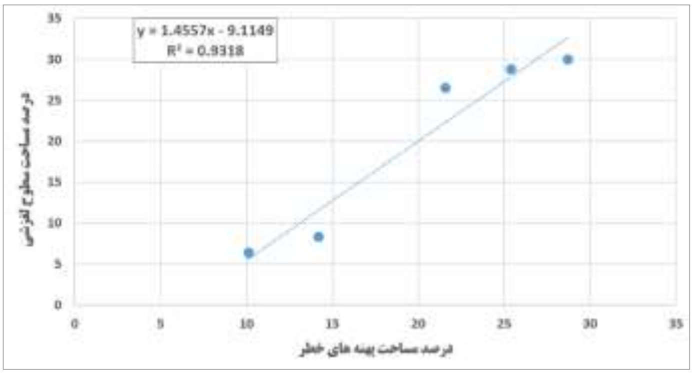


شکل ۵- نقشه نهایی پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در منطقه کلور

نتایج صحت سنجی تعیین مناطق خطر رخ داد زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه در جدول ۳ و شکل ٦ ارائه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، پهنه‌های با خطر زیاد و خیلی زیاد بیش از ٥٤ درصد منطقه را شامل می‌شوند و حدود ٦٥ درصد از سطوح لغزشی موجود در این پهنه‌ها واقع هستند که دلیل اصلی آن شیب زیاد و لیتولوژی سست است. علاوه براین، حدود ٢٦/٥ درصد از سطوح لغزشی در پهنه‌های با خطر متوسط که ٢١/٥٧ درصد منطقه را در برگرفته، واقع هستند. درنهایت، حدود ١٤/٧٠ درصد از سطوح لغزشی نیز در پهنه‌های با خطر کم و خیلی کم که ٢٤/٣٤ درصد منطقه را شامل می‌شوند، گسترده شده است. با توجه به بررسی‌های میدانی انجام شده دلیل وجود سطوح لغزشی در پهنه‌های خطر کم و خیلی کم عمدتاً حرکت و گسترش زبانه‌های لغزشی بزرگ در پای دامنه‌های پر شیب وکف دره‌ها است که روی سازندهای آبرفتی و اراضی کم شیب را پوشانده‌اند. با توجه به نتایج به دست آمده و رابطه درصد مساحت پهنه‌های خطر و درصد سطح لغزشی (شکل ٦) با R^2 بیش از ٠/٩٣، صحت نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در منطقه موردمطالعه با استفاده از فرایند تحلیل شبکه‌ای و قضیه بیز قابل قبول است. همچنین یافته مذکور با نتایج پژوهش‌های قبلی ازجمله روستایی و همکاران (١٣٩٣ و ١٣٩٤)، اسفندیاری درآباد و بهشتی جاوید (١٣٩٥)، شمس و علیزاده (١٣٩٧)، رنجبری و همکاران (١٣٩٨) مطابقت دارد. به‌طوری که این مطالعات نیز نشان دادند که مدل‌های تحلیل شبکه‌ای و قضیه بیز برای مناطق موردمطالعه آنان نتایج قابل قبولی ارائه کرده است.

جدول ٣- پهنه‌های خطر زمین‌لغزش و درصد سطوح لغزشی

خطر زمین‌لغزش	مساحت پهنه خطر (km^2)	درصد پهنه خطر	مساحت زمین‌لغزش (km^2)	درصد زمین‌لغزش
خیلی کم	٢٩/٧٣	١٠/١٣	٠/٩٢	٦/٢
کم	٤١/٦٨	١٤/٢١	١/٢٠	٨/١
متوسط	٦٣/٢٩	٢١/٥٧	٣/٠٥	٢٠/٧
زیاد	٧٤/٥١	٢٥/٤٠	٤/١٢	٢٨
خیلی زیاد	٨٤/١٩	٢٨/٦٩	٥/٤٥	٣٧
جمع	٢٩٣/٤	١٠٠	١٤/٧٤	١٠٠



شکل ٦- رابطه درصد مساحت پهنه‌های خطر و درصد سطح لغزشی

٤- جمع‌بندی

شناسایی عوامل مؤثر در وقوع زمین‌لغزش‌های موجود در یک منطقه و پهنه‌بندی آن یکی از فاکتورهای اساسی جهت دستیابی به راهکارهای کنترل این پدیده و انتخاب مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین گزینه مؤثر است. ارزیابی حساسیت زمین‌لغزش، فرآیندی پیچیده و چند مرحله‌ای است که توسط بسیاری از محققان موردبررسی قرار گرفته است. هراندازه انتخاب عوامل مؤثر و کلاس‌بندی آن‌ها دقیق‌تر باشد، نتیجه به‌دست‌آمده نیز به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود. نقشه‌های مناطق مستعد زمین‌لغزش، همان‌طور که از ابتدا برنکنف و همکاران[1] (١٩٩٨)، بر آن تأکید کردند، ابزاری ارزشمند برای برنامه‌ریزی زمین و کاهش هزینه‌های رخ داد زمین‌لغزش هستند. بااین‌حال، نقشه‌های حساسیت به زمین‌لغزش برای اهداف برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری چشم‌انداز آن‌طور که توسط محققان اولیه (براب، ١٩٩١)، پیش‌بینی شده بود، رایج نشده است. باوجوداین، استانداردهای مشترک و افزایش دسترسی به داده‌های زمین‌لغزش و اطلاعات موضوعی به گسترش ارزیابی‌های حساسیت زمین و به‌ویژه برنامه‌ریزی‌های محیطی و آمایش سرزمین در آینده کمک می‌کند. این نکته را نیز باید در نظر گرفت که نتایج حاصل از تعیین پهنه‌های خطر زمین‌لغزش

1. Bernknopf et al.

ممکن است برای کاربردهای مختلف تغییر کند (به‌عنوان‌مثال استفاده از آن در سیستم‌های هشدار اولیه یا استفاده از آن در آمایش سرزمین و مدیریت محیطی).

در پژوهش حاضر با استفاده از روش‌های فرایند تحلیل شبکه‌ای (ANP) و احتمالات شرطی (قضیه بیز)، عرصه‌های آسیب‌پذیر و مناطق حساس نسبت به احتمال خطر وقوع زمین‌لغزش شناسایی و معرفی گردید که می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های آتی موردتوجه مسئولان امر قرار گیرد و از خسارت‌های مربوطه جلوگیری به عمل آید. در این منطقه شیب زیاد و وجود سازندهای آهکی مارنی، شیلی آهکی و ماسه‌سنگ‌های مارن‌دار ژوراسیک تا کرتاسه که بر اثر نئوتکتونیک فعال منطقه درز و شکاف‌دار شده و بر اثر عوامل تخریب مکانیکی به‌شدت خرد شده هستند، زمینه را برای ناپایداری دامنه‌های این منطقه فراهم کرده است. شواهد متعددی از زمین‌لغزش‌های پلیستوسن تا عهدحاضر در محدوده مطالعاتی قابل‌تشخیص است. زمین‌لغزش‌های بزرگ منطقه عمدتاً در دامنه‌های آهکی مارنی و شیلی قرار دارند و پهنه‌های سولیفلوکسیونی در سنگ‌های آهکی نازک لایه و ماسه‌سنگ‌های مارن‌دار ایجاد شده‌اند، پهنه‌های سولیفلوکسیونی دامنه‌های جنوب شهر کلور با اینکه حرکت نسبتاً کندی دارند ولی از نظر تعادل حدی قابلیت آن را دارند که در هنگام وقوع زمین‌لرزه یا بارش‌های مداوم و شدید به زمین‌لغزش‌های بزرگ تبدیل شوند. در این صورت، به علت قرار داشتن سطوح لغزش در بخش‌های میانی و مرتفع دامنه‌ها، محدوده بزرگ‌تری را در معرض تهدید قرار داده و شدت تخریب آن‌ها در بخش پایین‌دست دامنه زیاد خواهد بود؛ بنابراین، انتخاب روش‌های مناسب پایدارسازی نظیر زهکشی زیرسطحی می‌تواند در کاهش مخاطرات ناشی از این پدیده مؤثر باشد. در دامنه‌های این منطقه باید از ایجاد ترانشه‌های غیر اصولی عمود بر شیب و حفاری و خاک‌برداری‌های پای دامنه‌ها پرهیز شود. همچنین احداث دیواره‌های حائل در بخش‌هایی از ساحل رودخانه‌های اصلی بخصوص در امتداد دره کلور از حفر و زیرشویی پای دامنه‌های لغزشی جلوگیری نموده و شدت لغزش‌ها را کاهش می‌دهد. علاوه براین، در مناطقی که با خطر خیلی زیاد و زیاد مشخص شده‌اند، بهتر است مطالعات پایداری شیب‌ها متناسب با شرایط ویژه هر دامنه انجام شود؛ زیرا مکانیسم لغزشی دامنه‌ها در این منطقه یکسان نیست. درنهایت با توجه به هزینه‌بر بودن و کارایی ضعیف روش‌های سازه‌ای برای تثبیت دامنه‌های جنوبی نقاط مسکونی منطقه کلور، بهتر است محدودیت‌های لازم برای احداث تأسیسات در ساحل جنوبی رودخانه و پای دامنه‌ها اعمال گردد.

کتابنامه

اســفندیاری درآباد، فریبا؛ ابراهیم، بهشــتی جاوید؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حســاســیت وقوع زمین‌لغزش با اســتفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز ANP (مطالعه موردی: گردنه حیران). *نشریه هیدروژئومورفولوژی*. شماره ۸. ۹۳–۱۱۱. DOI: 20.1001.1.23833254.1395.3.8.5.3

پورقاســمی، حمیدرضا؛ مرادی، حمیدرضا؛ محمدی، مجید؛ مصطفی‌زاده، رئوف؛ گلی جیرنده، عباس؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش با استفاده از تئوری بیزین. *مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی. علوم آب و خاک*. شماره ٦۲. ۱۰۹–۱۲۱. DOI: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.10.9

پیش‌نماز احمدی، مجید؛ محمد زاده، کیوان؛ ثقفی، مهدی؛ ۱۳۹۷. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش و خطرپذیری ســکونتگاه‌های روســتایی در زیرحوضــه رودبار با اســتفاده از روش تحلیل شــبکه (ANP). *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. شماره ۱. ۲۱۱–۲۲۵. DOI: 20.1001.1.22519424.1397.7.1.14.8

رنجبری، احد؛ عابدینی، موسی؛ مختاری، داود؛ ۱۳۹۸. تجزیه‌وتحلیل خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل‌های ANP و LRدر محیط GIS (مطالعه موردی: پهنه گســلی قوشــاداغ-ارســباران در آذربایجان شــرقی). *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. شماره ۱. ۷۰–۸۸.
http://www.geomorphologyjournal.ir/article_91726.html

روســتایی، شــهرام؛ خدائی، لیلا؛ مختاری، داود؛ رضــا طبع، خدیجه؛ خدائی، فاطمه؛ ۱۳۹٤. کاربرد تحلیل شــبکه‌ای (ANP) در بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در محدوده سد قلعه چای. *مجله مخاطرات محیط طبیعی*. شماره ۵. ۵۹–۷٤. DOI: 10.22111/JNEH.2015.2475

روستایی، شهرام؛ مختاری، داوود؛ حسینی، زهرا؛ اطمانی حقویران، مهدی؛ ۱۳۹٤. بررسی پتانسیل وقوع زمین‌لغزش در حوضه آبخیز رودخانه میمه به روش تحلیل شبکه. *مجله هیدروژئومورفولوژی*. شماره ٤. ۱۰۱–۱۲۳.
DOI:20.1001.1.23833254.1394.2.4.6.9

شاهکوئی، اسماعیل؛ سارلی، رضا؛ درویشی، یوسف؛ امان‌پور قرائی، سمانه؛ ۱۳۹۸. پهنه‌بندی عرصه‌های آسیب‌پذیر در برابر مخاطرات طبیعی با تأکید بر زمین‌لغزش مطالعه موردی: زیر حوضــه گرگان رود شــهرســتان گرگان. *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمّی*. شماره ۲. ۵۲–۷۰. http://noo.rs/VdlKD

شــکاری‌بادی، علی؛ معتمدی راد، علی؛ محمدی نیا، ملیحه؛ ۱۳۹٤. تلفیق مدل ANP و شــاخص آنتروپی شــانون در برآورد عوامل مؤثر در وقوع و پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش (مطالعه موردی: حوضــه فاروبرومان نیشــابور). *مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. شماره ۲۲. ۸۹–۱۰۳.
http://journals.hsu.ac.ir/jarhs/article-1-1001-fa.html

شمس، جلیل؛ علیزاده، البروس؛ ۱۳۹۷). پهنه‌بندی حساسیت خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل احتمالات شرطی (قضیه بیز)، مطالعه موردی: قاراداغ (ارسباران، از قره‌سو تا دره دیز). *نشریه علمی -پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی*. شماره ٦۳. ۱٦۱–۱۸۲. https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=527864

صفاری، امیر؛ هاشمی، معصومه؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت زمین‌لغزش با مدل آنتروپی و منطق فازی (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). *فصلنامه جغرافیای طبیعی*. شماره ۳٤. ٤۳-٦۲. 20.1001.1.20085656.1395.9.34.3.1

عابدینی، موسی؛ روستایی، شهرام؛ فتحی، محمد حسین؛ ۱۳۹۵. پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل هیبریدی قضیه بیز و ANP (مطالعه موردی: کرانه جنوبی حوضه آبریز اهرچای از روستای نصیرآباد تا سد ستارخان). *مجله پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*. شماره ۱. ۱٤۲-۱۵۹.
DOI:20.1001.1.22519424.1395.5.1.10.0

مجد باوی، اکبر؛ مومی پور، مهدی؛ ۱٤۰۰. پهنه‌بندی مناطق مستعد خطر زمین‌لغزش در محدودهٔ سد شهید عباسپور. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*. شماره ۱۰. ٦۵-۸۰. DOI: 10.22067/GEOEH.2021.67029.0

محمدخان شیرین؛ ویسی، عبدالکریم؛ باقری، کیوان؛ ۱۳۹۳. پتانسیل‌سنجی خطر زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (منطقه کوهستانی شیرپناه در جنوب غرب استان کرمانشاه). *مجله جغرافیایی سرزمین*. شماره ٤. ۸۹-۱۰۳.

محمودی، فرج اله؛ ۱۳۸۲. *ژئومورفولوژی دینامیک*. انتشارات دانشگاه تهران.
https://sarzamin.srbiau.ac.ir/article_7991.html

مقصودی، مهران؛ شرفی، سیامک؛ یمانی، مجتبی؛ مقدم، عباس و زمانزاده، سید محمد؛ ۱۳۹٤. تغییرات محیطی بعد از رخداد زمین‌لغزش کبیرکوه و تأثیر آن در شکل‌گیری محوطه‌های باستانی محدوده دریاچه جایدر. *فصلنامه کواترنری ایران*. شماره ۱. ۱-۱٤. http://journal.iranqua.ir/article-1-322-fa.html

مقیمی، ابراهیم؛ باقری سید شکری، سجاد؛ صفرراد، طاهر؛ ۱۳۹۱. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاقدیس نسار زاگرس شمال غربی). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. شماره ۷۹. ۷۹-۹۰.
DOI:10.22059/JPHGR.2012.24735

نظم‌فر، حسین؛ بهشتی، ابراهیم؛ ۱۳۹۵. کاربرد مدل ترکیبی فرآیند تحلیل شبکه و منطق فازی در پهنه‌بندی حساسیت وقوع زمین‌لغزش. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. شماره ۱. ۵۳-٦۸.
DOI:10.22108/GEP.2016.20793

یمانی، مجتبی؛ خداپور، سیروس؛ مصطفایی، ابولفضل؛ شادمان رود پشتی، مجید؛ ۱۳۹۱. نقشه پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش در حوضه آبخیز کارون بزرگ با استفاده از مدل AHP در محی GIS. *مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. شماره ٤. ۳۹-۵٦. DOI: 20.1001.1.20085362.1391.23.4.3.7

Basu T, Pal S., 2019. RS-GIS based morphometrical and geological multi- criteria approach to the landslide susceptibility mapping in Gish River Basin, West Bengal India. Advances in Space Research 3: 1253-1269. https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.10.033

Bera S, Guru B, Ramesh V., 2019. Evaluation of landslide susceptibility models: a comparative study on the part of Western Ghat Region, India. Remote Sensing Applications: Society and Environment 17: 39-52. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.010

Bernknopf RL, Cambell RH, Brookshire DS, Shapiro CD., 1998. A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation. Bulletin of the Association of Engineering Geologists 25: 39-56.
https://doi.org/10.2113/gseegeosci.xxv.1.39

Brabb EE., 1991. The world landslide problem. Episodes Journal of International Geoscience 14: 52-61. https://pubs.er.usgs.gov/publication/70197558

Chen K, Blong R, Jacobson C., 2012. MCE-Risk: Integrating Multicriteria Evolution and GIS for Risk Decision-Making in Natural Hazards. Environmental Modeling & Software 16: 387-397. DOI:10.1016/S1364-8152(01)00006-8

Chen W, He B, Zhang L, Nover D., 2016. Developing an integrated 2D and 3D WebGIS based platform for effective landslide hazard management. International Journal of Disaster Risk Reduction 20: 28-38. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.003

D'Errico G E, Murru, N., 2012. Fuzzy Treatment of Candidate Outliers in Measurements. Advances in Fuzzy Systems 1-6. DOI:10.1155/2012/783843

Denison DGT, Holmes CC, Mallick BK, Smith AFM., 2002. Bayesian Methods for Nonlinear Classification and Regression. John Wiley & Sons, Chichester, west Sussex. https://www.wiley.com/en-us/ Bayesian+ Methods+ for+ Nonlinear+ Classification+ and+ Regression- p-9780471490364

Faraji Sabokbar H, Shadman Roodposhti M, Tazik E., 2014. Landslide susceptibility mapping using geographically-weighted principal component analysis. Journal of Geomorphology 226: 15–24. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.07.026

Fathi M H, Khohdel K, Kandi Shoreh A, Ashrafi feini Z, Khaliji M A., 2015. The combination of spectral and spatial data in zoning oflandslide susceptibility (Case study: Sangorchay reservoir). Journal of Biodiversity and Environmental Sciences 2: 515-527. http://www.innspub.net/wp-content/upl...

Hattanji T, Moriwaki H., 2009. Morphometric Analysis of Relic Landslides Using Detailed Landslide Distribution Maps: Implications for Forecasting Travel Distance of Future Landslides. Journal of Geomorphology 3: 447-454. https:// doi.org/ 10.1016/ j.geomorph .2008. 07. 009

Lantada N, Pujades L, Barbat A., 2009. Vulnerability index and capacity spectrum based methods for urban seismic risk evaluation. A comparison, Natural Hazards 51:501-524. DOI:10.1007/s11069-007-9212-4

Melchiorre C, Tryggvason A., 2015. Application of a fast and efficient algorithm to assess landslide-prone areas in sensitive clays in Sweden. Natural Hazards and Earth System Sciences 12: 2703-2713. https://doi.org/10.5194/nhess-15-2703-2015

Neaupane KM, Piantanakulchai M., 2006. Analytic network process model for landslide hazard zonation, Engineering Geology 85: 281–294. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.02.003

Nefeslioglu HA, Duman TY, Durmaz S., 2008. Landslide susceptibilit, mapping for a part of tectonic Kelkit Valley (Eastern Black Sea region of Turkey). Journal of Geomorphology 94: 401-418. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.10.036

Piacentinia D, Troiani F, Soldati M, Notarnicola C, Savelli D, Schneiderbauer S, Strada C., 2012. Statistical analysis for assessing shallow-landslide susceptibility in South Tyrol (south-eastern Alps, Italy). Journal of Geomorphology 151-152: 196-206. DOI: 10.1016/ j. geomorph. 2012.02.003

Pradhan B., 2011. An Assessment of the Use of an Advanced Neural Network Model with Five Different Training Strategies for the Preparation of Landslide Susceptibility Maps. Journal of Data Science 9: 65-81. DOI:10.6339/JDS.201101_09(1).0006

Samodra G, Chen G, Sartohadi J, Kasama K., 2018. Generating landslide inventory by participatory mapping: an example in Purwosari Area, Yogyakarta Java. Journal of Geomorphology 306: 306-313. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.07.035

Shadman Roodposhti M, Rahimi S, Jafarbeglou M., 2013. PROMETHEE II and fuzzy AHP: an enhanced GIS-based landslide susceptibility mapping. Journal of Nat Hazards 1: 95-77. DOI: 10. 1007/ s11069-012-0523-8

Yamin F, Rahman A, Huq S., 2005. Vulnerability, Adaptation and Climate Disasters: A Conceptual overview. Institute of Development Studies Bulletin 4: 1-14. https://doi.org/ 10.1111/ j.1759-5436.2005.tb00231.x

Zhu A-X, Wang R, Qiao J, Qin C-Z, Chen Y, Liu J, Du F, Lin Y, Zhu T., 2014. An expert knowledge- based approach to landslide susceptibility mapping using GIS and fuzzy logic. Journal of Geomorphology 214: 128-138. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.003